

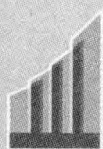


高等学校新体系土木工程系列教材

混凝土结构 设计原理

白国良 薛建阳 杨勇 门进杰 编

高等教育出版社



高等学校新体



混凝土结构 设计原理

白国良 薛建阳 杨勇 门进杰 编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是高等学校新体系土木工程系列教材之一。根据高等学校土木工程学科专业指导委员会制定的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和最新的国家规范、标准编写而成,包含了土木工程专业中有关混凝土结构基本原理和方法的全部核心知识单元及其相应知识点。全书共分10章,包括:绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,结构设计的基本原理,受弯构件正截面性能与承载力计算,受压构件正截面性能与承载力计算,受拉构件正截面性能与承载力计算,构件斜截面受剪性能与承载力计算,受扭构件扭曲截面受力性能与承载力计算,构件的裂缝、变形验算及耐久性设计,预应力混凝土构件的原理与设计。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材,也可供从事土木工程设计、施工和科研等方面的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/白国良等编. --北京:高等教育出版社,2017.4

ISBN 978-7-04-047281-3

I. ①混… II. ①白… III. ①混凝土结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020834 号

策划编辑 水渊

责任编辑 水渊

封面设计 李小璐

版式设计 杜微言

插图绘制 杜晓丹

责任校对 陈旭颖

责任印制 刘思涵

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印 刷 廊坊市科通印业有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.75

字 数 490千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2017年4月第1版

印 次 2017年4月第1次印刷

定 价 36.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 47281-00

序

随着高等学校土木工程学科专业指导委员会 2011 年编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的实施,同时,为及时将各高校精品课程建设与教学改革成果吸收固化到教材中去,向高校土木工程专业人才培养提供优质教学资源,高等教育出版社于 2012 年 8 月在桂林组织召开了“新体系土木工程系列教材组稿会”,邀请到西安建筑科技大学、西安交通大学、兰州理工大学、沈阳建筑大学、长沙理工大学、石家庄铁道大学等近 20 所高校的专家和教师参加了会议。

会上交流研讨了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的实施经验和新体系土木工程专业系列教材的编写原则与特色:以行业企业需求为导向,以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力、工程设计能力和工程创新能力。对系列教材的出版达成一致意见,希望通过各高校与我社的共同努力,出版一套符合新的专业规范、新体系的、偏向“大土木”的系列化教材,更好地满足高校土木工程专业课程教学需求,对土木工程专业教材建设、资源建设起到积极的推动作用。

本系列教材的编写经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,恳请读者批评指正!

高等教育出版社
建筑与力学分社
2013 年 9 月

前 言

混凝土结构设计原理是土木工程专业的重要专业基础课之一。本教材的编写力求体现高等学校土木工程学科专业指导委员会制定的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的要求,内容包含了土木工程专业本科学生在混凝土结构原理与方法知识领域必须具备的基础知识,满足后续专业课学习必备的内容要求,符合培养合格土木工程专业人才目标的相关知识要求。

土木工程专业的应用范围覆盖建筑工程、交通土建工程、地下工程、矿井建设、铁道工程、港口工程、水利工程等,涉及工程领域广泛。混凝土结构的类型很多,但其基本构件的受力特点具有共性。本教材内容的安排,突出了受力性能分析,重视基础理论介绍,引导学生认识、掌握混凝土结构的基本原理与计算方法。在内容和体系上注重学生从数学、力学基础课程学习过渡到专业课程学习的认知规律,以混凝土构件的力学机理为基础,从材料性能、截面受力特征到构件抗力机理、承载力及变形计算方法,形成完整体系。主要内容包括:混凝土结构材料的物理力学性能,结构设计的基本原理,受弯构件正截面性能与承载力计算,受压构件正截面性能与承载力计算,受拉构件正截面性能与承载力计算,构件斜截面受剪性能与承载力计算,受扭构件扭曲截面受力性能与承载力计算,构件的裂缝、变形验算及耐久性设计,预应力混凝土构件的原理与设计。教材中有典型的计算例题,便于读者理解和掌握相关内容;各章后有小结、思考题、习题等内容,有利于读者学习。

本教材由西安建筑科技大学土木工程学院部分教师编写。第1章、第2章、第10章由白国良编写,第3章、第4章、第7章由薛建阳编写,第5章、第6章由杨勇编写,第8章、第9章由门进杰编写,全书由白国良教授统稿。

资深教授童岳生先生审阅了本教材,并提出宝贵意见;博士生杜宁军为本书的插图绘制、例题试算、数据核实做了大量工作,博士生赵金全、尹玉光、祁豪为本书绘制了部分插图和试算了部分例题。在此一并表示诚挚的谢意。

希望本书能为读者提供帮助。但限于编者的水平,书中可能存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2016年10月

目 录

第 1 章 绪论	1	本章小结	40
1.1 混凝土结构的概念与特点	1	思考题	40
1.1.1 混凝土结构的基本概念	1	第 3 章 结构设计的基本原理	42
1.1.2 混凝土结构的特点	2	3.1 结构可靠度及结构安全等级	42
1.2 混凝土结构的组成与基本构件	3	3.1.1 结构上的作用、作用效应、 结构抗力	42
1.3 混凝土结构的发展与应用	4	3.1.2 结构的预定功能	43
1.3.1 混凝土结构的发展	4	3.1.3 结构可靠度和安全等级	43
1.3.2 混凝土结构的应用	5	3.2 荷载和材料强度的标准值	44
1.4 课程内容与特点	7	3.2.1 荷载标准值	44
1.4.1 课程内容	7	3.2.2 材料强度标准值	45
1.4.2 课程特点与学习方法	7	3.3 概率极限状态设计法	45
本章小结	8	3.3.1 结构的极限状态	45
思考题	8	3.3.2 结构的设计状况	46
第 2 章 混凝土结构材料的物理力学		3.3.3 结构的功能函数和极限 状态方程	46
性能	9	3.3.4 结构可靠度的计算	47
2.1 概述	9	3.4 极限状态设计表达式	49
2.2 钢筋的基本性能	9	3.4.1 承载能力极限状态设计 表达式	49
2.2.1 钢筋的品种和级别	9	3.4.2 正常使用极限状态设计 表达式	52
2.2.2 钢筋强度和变形性能	10	本章小结	54
2.2.3 钢筋的冷加工	13	思考题	54
2.2.4 钢筋的疲劳性能	14	第 4 章 受弯构件正截面性能与承载力	
2.2.5 混凝土结构对钢筋性能的要求	15	计算	56
2.3 混凝土的基本性能	16	4.1 概述	56
2.3.1 混凝土的组成	16	4.2 正截面受弯性能试验研究	56
2.3.2 混凝土的强度	16	4.2.1 试验设计	56
2.3.3 混凝土的变形	24	4.2.2 适筋梁正截面受力的三个 阶段	57
2.4 钢筋与混凝土的粘结	33	4.2.3 正截面受弯的破坏形态	59
2.4.1 粘结应力的特点	33	4.3 正截面受弯承载力分析	60
2.4.2 粘结破坏机理	35		
2.4.3 影响粘结强度的主要因素	36		
2.4.4 钢筋的锚固长度	37		
2.4.5 钢筋的绑扎搭接	39		

4.3.1	基本假定	60	5.4.3	附加偏心距 e_n 、初始 偏心距 e_i	101
4.3.2	受压区等效矩形应力图形	61	5.4.4	界限破坏	101
4.3.3	界限受压区高度与最小 配筋率	62	5.4.5	偏心受压长柱二阶附加 弯矩	102
4.4	单筋矩形截面受弯承载力计算	64	5.4.6	柱偏心距增大系数的计算	104
4.4.1	基本公式及适用条件	64	5.4.7	极限状态时截面应力分析	108
4.4.2	计算系数	65	5.5	矩形截面偏心受压柱正截面承载力 计算	109
4.4.3	基本公式的应用	66	5.5.1	非对称配筋矩形截面偏心 受压柱正截面承载力计算	109
4.5	双筋矩形截面受弯承载力计算	69	5.5.2	对称配筋矩形截面偏心受压 柱正截面承载力分析	119
4.5.1	概述	69	5.5.3	对称配筋矩形截面偏压柱 $\bar{M}-\bar{N}$ 相关曲线分析	123
4.5.2	受压钢筋的应力	69	5.6	I形截面偏心受压柱的正截面受压 承载力	128
4.5.3	基本公式及适用条件	70	5.6.1	非对称配筋 I 形截面	128
4.5.4	基本公式的应用	71	5.6.2	对称配筋 I 形截面	130
4.6	T 形截面受弯承载力计算	75	5.7	双向偏心受压柱承载力计算	131
4.6.1	概述	75	5.7.1	理论计算方法	132
4.6.2	T 形截面翼缘的计算宽度	76	5.7.2	近似计算方法	134
4.6.3	基本公式及适用条件	76	本章小结	137	
4.6.4	基本公式的应用	79	思考题	138	
4.7	受弯构件的一般构造要求	83	习题	138	
4.7.1	板的构造要求	83			
4.7.2	梁的构造要求	84			
本章小结		85			
思考题		86			
习题		86			
第 5 章	受压构件正截面性能与承载力 计算	88	第 6 章	受拉构件正截面性能与承载力 计算	140
5.1	概述	88	6.1	轴心受拉构件承载力计算	140
5.2	柱的一般构造及要求	89	6.1.1	轴心受拉构件的受力特点	140
5.2.1	截面形式与尺寸	89	6.1.2	承载力计算公式	141
5.2.2	材料选择	89	6.2	矩形截面偏心受拉构件正截面 承载力	141
5.2.3	纵向钢筋	89	6.2.1	偏心受拉构件的破坏形态	141
5.2.4	箍筋	90	6.2.2	小偏心受拉构件正截面 承载力计算	142
5.3	轴心受压柱正截面受压承载力	91	6.2.3	大偏心受拉构件正截面 承载力计算	142
5.3.1	普通箍筋轴心受压柱	92	6.2.4	截面设计	143
5.3.2	螺旋箍筋轴心受压柱	95			
5.4	偏心受压柱正截面受力性能	98			
5.4.1	偏心受压柱破坏形态	98			
5.4.2	偏心受压柱的二阶弯矩	100			

6.2.5 截面承载力复核	144	7.7 钢筋的构造要求	174
本章小结	147	7.7.1 梁内纵向钢筋锚固的构造 要求	174
思考题	147	7.7.2 梁内箍筋的构造要求	175
习题	147	7.7.3 梁内弯起钢筋的构造要求	175
第7章 构件斜截面受剪性能与承载力 计算	149	7.7.4 柱中箍筋的构造要求	176
7.1 概述	149	本章小结	176
7.2 受弯构件受剪性能的试验研究	149	思考题	177
7.2.1 无腹筋简支梁的受剪性能	149	习题	178
7.2.2 有腹筋简支梁的受剪性能	152	第8章 受扭构件扭曲截面受力性能 与承载力计算	180
7.2.3 影响斜截面受剪承载力的 主要因素	154	8.1 概述	180
7.3 受弯构件斜截面受剪承载力计算	155	8.2 纯扭构件的受力性能和承载力 计算	181
7.3.1 计算原则	155	8.2.1 试验研究	181
7.3.2 仅配有箍筋梁的斜截面 受剪承载力计算	156	8.2.2 纯扭构件的开裂扭矩	182
7.3.3 配有箍筋和弯起钢筋梁的 斜截面受剪承载力计算	156	8.2.3 纯扭构件的受扭承载力	184
7.3.4 公式的适用范围	157	8.3 复合受扭构件的受力性能和 承载力计算	187
7.3.5 板类构件的受剪承载力 计算	158	8.3.1 剪扭构件承载力计算	187
7.4 受弯构件斜截面受剪承载力的 设计计算	159	8.3.2 弯扭构件承载力计算	189
7.4.1 计算截面的确定	159	8.3.3 弯剪扭构件承载力计算	189
7.4.2 截面设计	159	8.3.4 压弯剪扭构件承载力计算	199
7.4.3 截面复核	164	8.3.5 拉弯剪扭构件承载力计算	200
7.5 受弯构件斜截面受弯承载力	166	8.4 协调扭转	201
7.5.1 抵抗弯矩图	167	本章小结	201
7.5.2 纵向钢筋的弯起	169	思考题	202
7.5.3 纵筋的截断	170	习题	202
7.6 偏心受力构件的斜截面受剪承载力 计算	171	第9章 构件的裂缝、变形验算及 耐久性设计	203
7.6.1 偏心受压构件斜截面受剪 承载力计算	171	9.1 概述	203
7.6.2 偏心受拉构件斜截面受剪 承载力计算	172	9.1.1 裂缝的控制	203
7.6.3 框架柱双向受剪承载力 计算	172	9.1.2 变形的控制	203
		9.2 混凝土构件裂缝宽度验算	204
		9.2.1 平均裂缝间距	204
		9.2.2 裂缝宽度	207
		9.2.3 影响裂缝宽度的因素	211
		9.3 混凝土受弯构件的挠度验算	214

9.3.1	截面弯曲刚度的概念 及特点	214	10.2.4	先张法预应力钢筋的 传递长度	248
9.3.2	短期刚度的计算	215	10.3	预应力混凝土轴心受拉构件的 应力分析与计算	249
9.3.3	受弯构件的截面弯曲 刚度计算	218	10.3.1	轴心受拉构件的应力 分析	249
9.3.4	受弯构件的变形验算	219	10.3.2	轴心受拉构件的设计 计算	255
9.3.5	减小挠度的主要措施	220	10.3.3	轴心受拉构件设计计算 实例	261
9.4	混凝土结构的耐久性	222	10.4	预应力混凝土受弯构件的应力 分析与设计计算	265
9.4.1	影响耐久性的主要因素及 设计对策	222	10.4.1	受弯构件的应力分析	265
9.4.2	混凝土结构耐久性设计的 内容与要求	224	10.4.2	受弯构件承载力计算	270
	本章小结	226	10.4.3	正常使用极限状态验算	273
	思考题	227	10.4.4	受弯构件施工阶段验算	278
	习题	227	10.4.5	受弯构件设计计算实例	279
第 10 章	预应力混凝土构件的原理 与设计	229	10.5	预应力混凝土构件的构造要求	288
10.1	预应力混凝土的基本概念	229	10.5.1	一般构造要求	288
10.1.1	预应力混凝土的定义	229	10.5.2	先张法构件的构造要求	289
10.1.2	预应力混凝土的分类	230	10.5.3	后张法构件的构造要求	289
10.1.3	预应力混凝土的材料	233		本章小结	292
10.1.4	预应力混凝土的锚具 与设备	237		思考题	293
10.2	张拉控制应力与预应力损失	240		习题	294
10.2.1	张拉控制应力	240	附表		296
10.2.2	预应力损失	241	参考文献		304
10.2.3	预应力损失的组合	248			

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构的概念与特点

1.1.1 混凝土结构的基本概念

土木工程领域中的工程结构因所用的建筑材料不同,可分为混凝土结构、钢结构、钢-混凝土组合结构、砌体结构和木结构等。混凝土结构是以混凝土为主要材料浇筑制成的结构,而混凝土是由水泥作为胶凝材料,普通石、砂分别作为粗、细集料,加水按适当比例配合、拌制成拌合物,经凝结硬化而成的人工混合材料。混凝土结构主要包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构,其应用范围覆盖房屋建筑、地下建筑、桥梁、道路、隧道、矿井、水工结构等。

混凝土的强度特点是抗压强度较高,而抗拉强度很低。如果只用混凝土材料制作一根受弯的梁(图 1.1a),则根据材料力学可知,在荷载(包括自重)作用下,梁的下部会产生拉应力,上部会产生压应力。由于混凝土的抗拉强度远低于抗压强度,所以在很小的荷载作用下梁的下部就会开裂,从而使该梁很快失去承载能力(图 1.1b)。在荷载作用下,这种梁从弯矩最大截面受拉

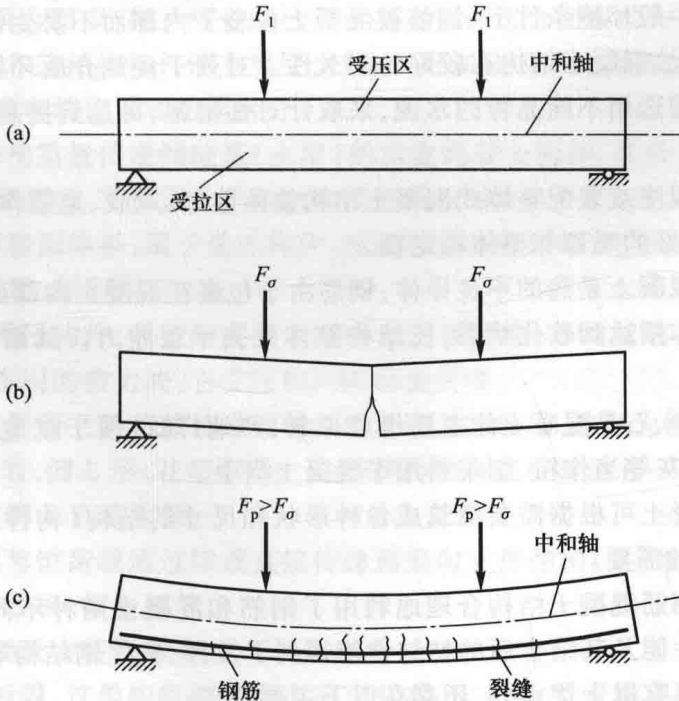


图 1.1 素混凝土梁与钢筋混凝土梁

边缘(即梁的下部)的混凝土出现裂缝,到整个梁破坏,经历时间很短、破坏很突然,极限承载力也很小。所以,对于在外荷载作用下或因其他因素会在截面中产生拉应力的结构,不应采用素混凝土结构。

如果在图 1.1 所示梁的截面受拉区混凝土内配置了适量的钢筋(图 1.1c),则当梁的下部混凝土受拉开裂后,该处的混凝土虽然不能继续承受拉力,但该梁下部配置的钢筋则可承担裂缝截面处因受拉混凝土开裂而不能承受的拉力。这样,该钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样发生突然的破坏,而在受拉区混凝土开裂后还可以继续增加荷载。钢筋由于具有很高的抗拉强度,能够继续承受拉力;而在梁的受压区由于混凝土具有较高的抗压强度,也能继续承受压力;直至钢筋应力达到屈服强度、受压区混凝土的抗压强度也得到充分发挥,梁达到其极限承载能力而破坏。这样可以充分发挥钢筋和混凝土两种材料的各自性能特长,使钢筋混凝土梁的承载能力较之素混凝土梁大幅提高。

将钢筋和混凝土两种性能不同的材料结合在一起,能发挥各自性能特长以抵御外部荷载和作用,使其有效地共同工作,基于下述条件:

(1) 钢筋混凝土结构中的钢筋和混凝土之间存在粘结力。混凝土硬化后与钢筋(尤其是变形钢筋)之间有粘结力,在外部荷载作用下协调变形与受力,共同工作。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数相近,钢材为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,混凝土为 $(1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}) / ^\circ\text{C}$ 。两者十分接近,当温度变化时,两种材料不会产生较大的相对变形而使其间的粘结应力受到破坏。

1.1.2 混凝土结构的特点

混凝土结构之所以成为土木工程中应用最为广泛的结构形式,因为它具有诸多优点:

(1) 耐久性好。一般环境条件下,钢筋被混凝土包裹于内部而不易生锈,混凝土的强度还随时间增长而略有提高,故混凝土结构有较好的耐久性。对处于侵蚀介质环境中的混凝土结构,可根据侵蚀的性质合理的选用不同品种的水泥,采取针对性措施,可达到提高耐久性和满足工程需要的目的。

(2) 整体性好。现浇或装配整体式混凝土结构整体性好,风载、地震作用和振动荷载下结构刚度的适应性好,有良好的局部和整体稳定性。

(3) 耐火性好。混凝土是热的不良导体,钢筋由于包裹在混凝土内部而受到保护,火灾时钢筋不至于很快受高温作用达到软化状态,使结构整体失去承载能力。其耐火性能较钢结构和木结构要好。

(4) 易于取材。砂、石是混凝土的主要组成原料,产地广泛,便于就地取材。另外还可以将工业废料如矿渣、粉煤灰等当作粗、细集料用于混凝土当中。

(5) 可模性。混凝土可根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构(构件),适用于形状复杂结构(构件)和建筑造型的需要。

(6) 合理用材。钢筋混凝土结构合理地利用了钢筋和混凝土两种不同材料的性能,使混凝土和钢筋的各自材料性能及其结合后的粘结性能得到了发挥,较之钢结构节约钢材。

混凝土结构除了具有以上优点外,还存在以下主要缺点:

(1) 自重大。钢筋混凝土的重力密度一般为 $23 \sim 25 \text{ kN/m}^3$,与钢结构相比由于混凝土结构

构件截面尺寸较大,导致结构自身重量大。这样不但减少结构承担的有效荷载,也因自重大导致结构地震作用增大。所以自重大对大跨度结构、高层结构抗震都是不利的。应发展高强高性能混凝土、预应力混凝土以减小钢筋混凝土结构截面尺寸,以及采用轻集料混凝土等均可减轻结构自重。

(2) 抗裂性能差。混凝土抗拉强度很低,一般结构(构件)中都有拉应力存在,在正常使用情况下截面受拉区通常都有裂缝。也就是说,构件在使用阶段一般是带裂缝工作的,这对防渗、防漏有要求的结构不适用;同时当裂缝过宽时,对构件的刚度和耐久性将带来不利的影 响。采用预应力混凝土可以有效地提高混凝土构件的抗裂性能;利用树脂涂层钢筋,可防止在恶劣环境下因混凝土开裂而导致的钢筋锈蚀。

(3) 工期长、费工费模。混凝土结构施工工序多、工期长,受季节气候影响较大;混凝土结构的制作,都需要用模板加工成形后浇筑,模板、支撑耗费量大。若采用木模,不但耗费大量的木材,且重复使用次数少、增加工程造价。利用可重复使用的钢模板、滑模施工技术等,采用泵送混凝土、早强混凝土、高性能混凝土、免振自密实混凝土等,可大幅提高施工效率。采用预制装配式结构,可以改善混凝土结构的制作条件,少受或不受气候条件的影 响,并能提高工程质量及加快施工进度等。

1.2 混凝土结构的组成与基本构件

混凝土结构按其构成的形式可分为实体结构和组合结构两大类。大坝、桥墩、基础等通常为实体,结构中混凝土的体积很大,称为实体结构;而建筑、桥梁、地下等工程中的混凝土结构通常由若干基本构件连接组合而成,称为组合结构。由基本构件组合而成的一般混凝土结构,按构件在结构中的位置、功能和按结构构件的主要受力特点,可划分成下列两类。

(1) 按构件在结构中的位置和功能区分

基础:是将上部结构重量传递到地基(土层)的承重混凝土构件,其形式多样,建筑结构中有独立基础、桩基础、条形基础、平板式筏基础和箱形基础等。

柱:其作用是支撑楼面体系,属于受压构件,荷载有偏心作用时,柱受压的同时还会受弯。其截面形式有矩形、工字形、圆形等。

墙:与柱相似,是受压构件,承重的混凝土墙常用作基础墙、楼梯间墙,或在高层建筑中用于承受水平风载和地震作用的剪力墙,它受压的同时也会受弯。

梁:是将楼面上或屋面上的荷载传递到柱或承重墙上的构件,前者为楼面梁,后者为屋面梁。梁截面形式有矩形、T形、倒L形、花篮形等。如当楼面梁与楼板整浇在一起时,中间的梁形成T形截面梁,边梁则形成倒L形截面梁。

楼板:是将活荷载与恒荷载通过梁或直接传递到竖向支撑结构(柱、墙)的主要水平构件,其形式可以是实心板、空心板、带肋板等。

(2) 按构件的主要受力特点区分

受弯构件:如梁、板等,这类构件的截面上有弯矩作用,故称受弯构件。与此同时,构件截面上也有剪力存在。

受压构件:如柱、墙等,这类构件都有压力作用。当压力沿构件纵轴作用在构件截面上时,则为轴心受压构件;如果压力在截面上不是沿纵轴作用或截面上同时有压力和弯矩作用时,则为偏心受压构件。柱、墙、拱等构件一般为偏心受压且还有剪力作用。所以,受压构件截面上一般作用有弯矩、轴力和剪力。

受拉构件:如屋架下弦杆件、拉杆拱中的拉杆等,通常按轴心受拉构件(忽略构件自重重力影响)考虑。又如层数较多的框架结构,在竖向荷载和水平荷载共同作用下,有的柱截面上除产生剪力和弯矩外,还可能出现拉力,则为偏心受拉构件。

受扭构件:如框架结构的边梁、曲梁等,这类构件的截面上除产生弯矩和剪力外,还会产生扭矩。因此,对这类结构构件应考虑弯矩、剪力、扭矩共同作用。

实际工程结构,从建造时承受的施工荷载到其后结构服役寿命期内承受的自重、外部荷载和风、地震、温度变化、基地不均匀变形等因素作用,结构构件大多都承受多个力或作用,即构件属于复合力作用,单一受力构件是很少的。

1.3 混凝土结构的发展与应用

1.3.1 混凝土结构的发展

混凝土结构与钢结构、砌体结构、木结构相比,历史不长,但自 19 世纪中叶开始使用后,由于混凝土和钢筋材料性能的不断改善,结构形式多样化发展,施工技术的不断进步,计算理论和设计方法逐步完善,使混凝土结构得到迅速发展。

1824 年波特兰水泥问世,此后大约在 19 世纪 50 年代开始,由于钢筋和混凝土的强度都很低,在欧洲的英法等国家,钢筋混凝土仅被用来建造一些简单的楼板、柱、基础等,其计算理论和设计方法尚未建立,沿用材料力学的容许应力方法进行设计。20 世纪 20 年代以后,预应力混凝土发明和开始应用,混凝土和钢筋强度也有所提高,许多国家陆续建造了一些钢筋混凝土房屋建筑,钢筋混凝土也开始应用于薄壳、折板等空间结构;随着钢筋混凝土性能的试验研究发展和人们认识的提高,计算理论开始考虑材料的塑性性能,采用按破损阶段计算构件的破坏承载力。进入 1950 年后,混凝土和钢筋材料强度不断提高,混凝土结构在土木工程各个领域大量使用,混凝土结构房屋的高度、混凝土桥梁结构的跨度和混凝土隧道的长度不断增大;钢筋混凝土结构工业化施工方法得到发展,工厂生产的预制构件也得到较广泛的应用;钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的应用范围进一步扩大,世界范围内混凝土结构进入快速发展时期;结构构件设计已过渡到按极限状态的设计方法。大致从 1980 年起,随着高强混凝土、高强钢筋的出现,新工艺和新施工方法的研究和开发,尤其是大模板现浇、大板等工业化体系发展和新结构体系的进一步应用,混凝土超高层建筑、大跨桥梁、特长隧道不断兴建;基于振动台试验、拟动力试验和风洞试验研究的结构响应分析和性能认识;随着计算机的发展,混凝土强度理论和本构关系的深入研究,结构分析引入数值方法和非线性有限元理论的广泛应用;计算机辅助设计和绘图的程序化,改进了设计方法并提高了设计质量;这些使混凝土结构计算理论和应用达到了一个新的阶段。结构构件的设计已发展到采用以概率论为基础的极限状态设计方法。

我国从 1889 年开始有了水泥工业,1908 年在上海建造中国最早的钢筋混凝土框架结构,从 20 世纪初至新中国建立,我国的混凝土结构发展速度慢,使用量少。新中国成立后,混凝土结构在土木工程领域得到广泛应用,特别是从 20 世纪 80 年代以后,我国混凝土结构建设进入黄金发展期。到目前,我国成为世界上水泥产量、混凝土用量最多的国家,在我国出现了世界上数量最多的钢筋混凝土高层建筑,数量最多和长度最长的混凝土桥梁,数量庞大的混凝土码头、隧道和大坝。我国在 20 世纪 50 年代初期,钢筋混凝土的计算理论由基于弹性方法的允许应力法过渡到考虑材料塑性的按破损阶段设计法。随着科学研究的深入和经验的积累,1966 年颁布了按多系数极限状态计算的设计规范《钢筋混凝土结构设计规范》(BJG 21—66)。1970 年提出了单一安全系数极限状态设计法,并于 1974 年正式颁布了《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74),它实质采用的是半概率法。1991 年我国颁布了《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89),2002 年颁布了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),2010 年颁布了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),均是采用近似概率的极限状态设计方法(近似概率法);这种方法以概率论为基础,以可靠度指标度量构件的可靠性,使极限状态法更趋完善、合理。

1.3.2 混凝土结构的应用

作为土木工程中最重要的一种结构类型,混凝土结构的应用极其广泛,已被广泛应用于工业和民用建筑、桥梁、隧道、矿井、水利、港口、近海工程及核电站建设等土木工程各个领域。

材料方面,钢筋和混凝土向高强度方向发展。随着高性能外加剂和混合材料的使用,工程上已大量使用 C80~C100 强度等级的混凝土,而试验室配置出的混凝土最高强度已达 266 N/mm^2 。国外预应力钢筋趋向于采用高强度、大直径、低松弛钢材,如热轧钢筋的屈服强度已达到 $600\sim 900 \text{ N/mm}^2$ 。耐久性混凝土、耐热混凝土等各种特殊用途的混凝土不断研制成功并获得应用。为了改善混凝土的工作性能,纤维混凝土、聚合物混凝土和防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等有特殊要求的混凝土也应用于实际工程中。为了减轻自重,各国都在发展各种轻质混凝土,如加气混凝土、陶粒混凝土等,其重力密度一般为 $14\sim 18 \text{ kN/m}^3$,强度可达 50 N/mm^2 。

房屋建筑中,工业厂房、住宅、办公楼和大型公共建筑,广泛采用钢筋混凝土结构。实际应用中,有梁、柱、墙、基础、楼(屋)盖等构件均采用钢筋混凝土的(全)钢筋混凝土结构,像工业结构中由钢筋混凝土排架柱、吊车梁、混凝土或预应力混凝土屋架、屋面板、独立基础等组成的单层钢筋混凝土厂房,多高层结构中梁、柱、基础、楼(屋)盖等均采用钢筋混凝土浇筑的框架结构。也有整体结构(体系)中部分构件(子结构)采用钢筋混凝土、部分构件(子结构)采用型钢混凝土、钢管混凝土等其他形式构件(子结构)组成的结构则称为钢-混凝土组合结构(混合结构),如柱为型钢混凝土、而梁为钢筋混凝土组成的框架一般称其为钢-混凝土组合结构,如钢筋混凝土核心筒与外围型钢混凝土框架或钢管混凝土框架组成的框架-核心筒结构则称其为混合结构。1996 年建成的广州中信广场,80 层,391 m 高,是世界上最高的钢筋混凝土建筑结构。1998 年建成的马来西亚石油双塔大厦,88 层,高 452 m;2003 年建成的中国台北国际金融中心,101 层,高 455 m;这两栋房屋均采用钢-混凝土混合结构,其高度已超过世界上最高的钢结构房屋(美国芝加哥西尔斯大厦)。我国上海金茂大厦,为筒中筒混合结构体系,其中内筒为钢筋混凝土结构,外

筒为型钢混凝土框架。2010年竣工投入使用的广州西塔属于复杂的钢-混凝土混合结构体系,采用钢管混凝土巨型斜交网格外筒、钢筋混凝土内筒,内外筒由钢-混凝土组合楼盖连接,结构主体高度432 m。2010年建成启用的迪拜哈利法塔,高达828 m,其中600 m以下为钢筋混凝土结构,以上为钢结构,为当前世界上的最高建筑。此外,在大型的公共建筑和工业建筑中,钢筋混凝土桁架、拱、薄壳结构也被大量应用。

钢筋混凝土桥梁结构被广泛应用。桥梁工程中的中小跨度桥梁绝大部分采用混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当多的是采用混凝土结构建造。如我国2008年建成通车的杭州湾跨海大桥全长36 km,其引桥采用跨度为30~80 m不等的预应力混凝土连续箱梁结构,是目前世界上最长的跨海大桥;1991年建成的挪威斯卡恩圣特预应力斜拉桥,主跨跨度达530 m,居世界第一位;重庆长江二桥为预应力混凝土斜拉桥,跨度达444 m,居世界第二位;广东珠江虎门大桥中的辅航道桥为预应力混凝土刚架公路桥,跨度为270 m;四川攀枝花预应力混凝土铁路刚架桥,跨度为168 m。公路混凝土拱桥应用也较多,其中突出的有1997年建成的四川万县长江大桥,为上承式拱桥,采用钢管混凝土和型钢骨架组成三室箱形截面,跨长420 m,为目前世界上第一长跨拱桥。贵州江界河330 m跨的桁架式组合拱桥、312 m跨的广西邕宁江中承式拱桥,以及我国西南交通干线南昆铁路上的许多桥梁等,都是钢筋混凝土结构。

隧道工程、地铁交通及地下工程多采用混凝土结构建造。我国已修建约2 500 km长的铁道隧道,其中成昆铁路线中有隧道427座,总长341 km,占全线路长31%;修建的公路隧道约400座,总长约80 km。我国秦岭终南山公路隧道是世界最长的双向高速公路隧道,单洞长18.02 km;日本1994年建成的青函海底隧道全长53.8 km,我国仅上海就修建了4条过江隧道。我国除北京、上海、天津、广州、南京、西安等10余个城市已有地铁外,许多城市正在建造地铁。我国许多城市建有地下商业街、地下停车场、地下仓库、地下工厂、地下旅店,正在大力发展的城市高架高速客运线等,其主体结构都是钢筋混凝土结构。

特种结构中的水塔、烟囱、筒仓、储水池、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也有很多采用混凝土结构。如:1989年建成的挪威北海混凝土近海采油平台,结构入水深度达216 m;瑞典马尔默水塔为10 000 m³容积的预应力混凝土水塔;加拿大多伦多电视塔,塔高553.3 m,为预应力混凝土结构;莫斯科奥斯坦电视塔,高537 m;天津电视塔,高415.2 m;北京中央电视塔,高405 m;上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成,高456 m;2009年建成的广州电视塔,总高度610 m,其中主塔450 m,发射天线桅杆160 m;我国宁波北仑火力发电厂建成高度达270 m的筒中筒烟囱;山西云岗建成两座容量为60 000 t的预应力混凝土煤仓等。

在水利工程中,水利枢纽的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管等也均采用钢筋混凝土结构。例如:瑞士大迪克桑斯坝,高285 m;俄罗斯的萨杨苏申克坝,高245 m;建于1936年的美国胡佛大坝高285 m;巴西和巴拉圭两国共有的伊泰普水电站大坝高221 m;我国于1989年建成的青海龙羊峡大坝,高178 m;四川二滩水电站拱坝高242 m;贵州乌江渡拱形重力坝高165 m;我国黄河小浪底水利枢纽中小浪底大坝最大坝高154 m,其主体工程中混凝土用量达 2.69×10^6 m³;我国长江三峡水利枢纽工程,其混凝土主坝高185 m,坝顶总长2 335 m,坝体混凝土用量达 2.794×10^7 m³,是目前世界上最大的水利工程。我国举世瞩目的南水北调大型工程,沿线建有很多预应力混凝土渡槽。

1.4 课程内容与特点

1.4.1 课程内容

如前所述,土木工程领域中的工程结构可分为混凝土结构、钢结构、钢-混凝土组合结构、砌体结构和木结构等,本课程涉及的是混凝土结构方面的内容,它是目前和今后很长时期内在我国应用最为广泛的主要结构类型。混凝土结构设计主要包括两部分内容:

(1) 首先根据结构构件使用功能要求及考虑经济、施工等条件,选择合理的结构方案,进行结构布置以及确定结构计算简图等;然后根据结构上所作用的荷载及其他作用,对结构进行内力分析,求出结构中各构件截面内力(包括弯矩、剪力、轴力、扭矩等)。

(2) 在前述基础上,对组成结构的各类构件分别进行截面设计,即确定构件截面所需的钢筋数量、配筋方式并采取必要的构造措施。

关于确定结构方案、进行结构内力分析等内容,将在混凝土结构设计的有关专业课中介绍。本课程讲述的是混凝土构件和预应力混凝土构件的计算原理、设计方法及构造要求。主要内容包括混凝土结构基本构件的弯曲、剪切、扭转、受压、受拉等受力性能、承载力、裂缝和变形计算及其构造技术等。这些内容是土木工程混凝土结构中的共性问题,即混凝土结构的基本理论,故本课程为土木工程专业的专业基础课。

1.4.2 课程特点与学习方法

(1) 学习本课程前应修完材料力学、建筑材料等课程。这些课程与混凝土结构有必然的联系但又有很大的不同。材料力学是研究线弹性条件下基本构件的强度和变形问题,而钢筋混凝土基本原理既涉及材料非匀质、非线性问题,又有两种材料间的粘结问题。材料力学中解决问题的思路和基本方法可以借鉴,如通过平衡条件、物理条件和几何条件建立基本方程的方法,对于钢筋混凝土构件也是适用的,且可以互相对比以加深理解,但计算理论和计算公式不能照搬。

(2) 钢筋混凝土构件的计算方法是建立在试验研究基础上的。钢筋和混凝土材料的力学性能指标通过试验确定;根据一定数量的构件受力性能试验,研究其受力性能和破坏机理,寻找破坏模式、并建立与其相对应的力学分析模型,确定主要影响参数,再根据试验数据拟合出半理论半经验公式。因此,学习时一定要深刻理解构件的破坏机理和受力性能,特别要注意构件计算方法的应用范围和计算公式的适用条件。

(3) 由于钢筋混凝土构件是由混凝土和钢筋两种力学性能不同的材料所组成的,为了取得良好的性能,针对承受的荷载和内力等条件,构件设计时两种材料在强度和数量上存在一个合理的配比范围。如果钢筋和混凝土在面积上的比例及材料强度的搭配超过了范围,就会引起构件受力性能的改变,从而引起构件截面设计方法的改变,实际构件也将发生非预期的破坏状态,这是学习时必须注意的一个方面。

(4) 本课程学习内容综合性很强,一方面有大量的性能分析和承载力、变形计算问题,另一方面还有如截面选择、材料选用及配筋构造等各种要求。这些构造措施或是考虑计算模型误差

的修正,或是试验研究的成果,或是长期工程实践经验的总结,它们与分析计算同为本课程重要的组成内容。学习时对构造要求方面的内容,不能轻视,应同样重视和理解掌握。

(5) 本课程面向土木工程专业,重在讲原理,而不是讲规范条文,书中所引用的规范规定和公式只是为了说明原理和方法。但本课程的实践性很强,其基本原理和设计方法必须通过具体设计来掌握,并在设计过程中逐步熟悉和正确运用我国有关的设计规范和标准。本课程的内容主要与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)等有关。设计规范是国家颁布的有关结构设计的技术规定和标准,规范条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带法律性的技术文件,而只有正确理解规范条文的概念和实质,才能正确地应用规范条文及其相应公式,充分发挥设计者的主动性以及更好地分析和解决问题。

本章小结

1.1 混凝土结构是以混凝土为主要材料浇筑制成的结构,也是现阶段应用较多的结构形式,它充分发挥了钢筋和混凝土两种材料各自的优点。在混凝土中配置钢筋后,可使构件的受力性能得到显著改善,承载力得到大幅提高。与其他结构相比,混凝土结构有诸多优点,也存在一些缺点。

1.2 钢筋和混凝土两种材料能够有效地结合在一起而共同工作,主要基于两个条件:钢筋与混凝土之间存在粘结力;两种材料的温度线膨胀系数很接近。

1.3 混凝土结构构件按其主要受力特点可以区分为受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等;按其在结构中的位置和功能可区分为梁、柱、板、墙、基础等。实际结构中,单一受力构件很少,构件一般须进行多种受力配筋计算。

1.4 钢筋混凝土构件的计算方法基于试验研究基础之上,通过数据和理论分析得出半理论半经验的设计公式。学习时应注意构件计算方法的应用范围和计算公式的适用条件,同时应重视构造要求内容的理解。

思考题

1-1 试分析素混凝土构件与钢筋混凝土构件在受力性能和承载力方面的差异。

1-2 钢筋与混凝土共同工作的基础是什么?

1-3 与其他结构相比,混凝土结构有哪些优点和缺点?

1-4 混凝土结构组成的基本构件有哪些?其受力特点是什么?

1-5 简述混凝土结构发展的情况和其应用的内容?